

The Driving Force of Water Quality Change at Fenhe River

Lu Bai¹, Juan Xiao¹, Xiaoyu Fan¹, Hong Xie^{1,2}

¹College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

²Dongshan Water Supply Engineering Construction Affairs Administration Bureau in Shanxi, Taiyuan Shanxi

Email: 862234203@qq.com

Received: Apr. 2nd, 2017; accepted: Apr. 15th, 2017; published: Apr. 18th, 2017

Abstract

The water pollution problem is getting more serious at Fenhe River in recent years. For the better management and planning river, six meteorological and non-meteorological factors were selected in this paper. The driving force of Fenhe River water quality change was calculated based on gray correlation analysis theory. The results show that the sequence of affecting the Fenhe river water quality driving force is: industrial (0.739) > life (0.710) > temperature (0.703) > runoff (0.688) > relative humidity (0.681) > rainfall (0.641).

Keywords

Gray Correlation Theory, The Water Quality Change, Driving Force, Fenhe River

汾河干流水质变化驱动力计算研究

白露¹, 肖娟¹, 范肖予¹, 谢洪^{1,2}

¹太原理工大学水利科学与工程学院, 山西 太原

²山西省东山供水工程建设管理局, 山西 太原

Email: 862234203@qq.com

收稿日期: 2017年4月2日; 录用日期: 2017年4月15日; 发布日期: 2017年4月18日

摘要

近年来, 汾河干流的水污染日益严重。为了更好地对汾河流域进行管理和规划, 选取6个气象和非气象因素, 作为汾河干流水质变化的因素影响因子。运用依据灰色关联度分析理论, 进行驱动力分析计算, 结果表明: 影

作者简介: 白露(1989年2月), 河北省南宮市, 硕士在读, 水资源和水生态保护。

响汾河干流水质的驱动力综合排列顺序为：工业(0.739) > 生活(0.710) > 温度(0.703) > 径流(0.688) > 相对湿度(0.681) > 降雨量(0.641)。

关键词

灰色关联度理论, 水质变化, 驱动力, 汾河干流

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汾河作为黄河的最大支流之一, 50年来容纳了山西省各个地区的50%以上的各类污水[1], 汾河水质的优劣不仅直接关系到沿河的水生态环境, 也与山西省各地区的人民生活息息相关。汾河干流总长是694 km, 流域面积约为39,471 km², 汾河不但为山西省提供了丰富的水资源等服务功能, 同时也不断接纳了沿途工农业生产和居民生活排出的各类污水[2], 污染较为严重, 这使得汾河水质不断发生变化。汾河干流水质绝大部分是处在劣V类水状态, 只有少数V类水以上, 常年处于劣V水状态使得汾河河道的下垫面、生物等受到严重破坏[3], 这对汾河流域的水生态保护具有很大的威胁。汾河干流贯穿大半个山西省, 途径众多重要县市, 随着人口数量增长, 城市不断地向周边扩张, 更多的工矿企业注入沿河地区[4]。由于前几十年人们单纯考虑经济效益, 对生态保护的意识薄弱, 汾河就成为废弃物、污水地容纳场所[5], 每年都有上百万吨污水未经过有效地处理直接汇入汾河, 最终随污水、洪水流入汾河而污染水质。加之汾河干流村庄的乱倾乱倒和人畜污水的排放更加重了污染[6]。

由于水体本身是一个多元复杂的系统, 影响水质的因素很多, 规律性很难总结, 使得一些指标难以量化只能进行定性的研究, 这给水质的预测和评价带来了很多的不确定性和较大的难度, 在实际应用中也存在一定的阻碍[7]。这就促进了不确定预测模型的发展, 由于灰色系统预测模型最大的优点就是即使在较少的历史数据下, 也可以得到较高的评价精度[8], 这使得灰色系统预测模型得到了很大的发展。本文针对目前汾河流域的现状, 将影响水质恶化的影响因子驱动力进行逐一排序比较, 为以后改善水质提供有力的理论支持, 不仅能改善汾河干流的水质恶化现状, 也为汾河流域的水生态保护奠定一定的基础。

2. 灰色关联度理论

(1) 确定分析序列

为了使研究问题的定性分析更加容易, 首先要确立一个因变量和多个自变量, 就是上一节所提到的水质影响因子的气象因素和非气象因素, 因变量构成矩阵 X_0 , 自变量构成矩阵 X_i , 然后将两个矩阵结合成一个新的比较序列 Z , 这个序列 Z 就是我们接下来需要分析的序列。

$$Z = (X_0 \quad X_i) = \begin{pmatrix} X_0^1 & X_1^1 & X_2^1 & \cdots & X_m^1 \\ X_0^2 & X_1^2 & X_2^2 & \cdots & X_m^2 \\ X_0^3 & X_1^3 & X_2^3 & \cdots & X_m^3 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_0^n & X_1^n & X_2^n & \cdots & X_m^n \end{pmatrix}$$

(2) 因为原始数据具有不同的数量级和量纲, 所以为了比较的方便将矩阵 Z 根据公式进行无量纲化, 形成

一个无量纲化矩阵 Y

$$Y_i^j = \frac{X_i^j}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i} \quad (i=1,2,\dots,n; j=0,1,2,\dots,m) \quad (1)$$

(3) 求绝对差值矩阵、最大值和最小值矩阵

根据无量纲化以后的比较序列 Y , 可以根据公式计算对应的绝对差值, 形成绝对差值矩阵 ∇ :

$$\nabla_i^j = |Y_1^j - Y_i^j| \quad (i=2,3,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

$$\nabla = \begin{pmatrix} \nabla_1^1 & \nabla_1^2 & \dots & \nabla_1^m \\ \nabla_2^1 & \nabla_2^2 & \dots & \nabla_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \nabla_n^1 & \nabla_n^2 & \dots & \nabla_n^m \end{pmatrix}$$

根据已经计算得出的绝对差值序列确定最大值和最小值矩阵

$$\text{最大值矩阵 } \nabla_{\max} = (\nabla_{\max}^1 \quad \nabla_{\max}^2 \quad \dots \quad \nabla_{\max}^m)$$

$$\text{最小值矩阵 } \nabla_{\min} = (\nabla_{\min}^1 \quad \nabla_{\min}^2 \quad \dots \quad \nabla_{\min}^m)$$

(4) 计算关联度

根据确定的绝对差值矩阵、最大值矩阵和最小值矩阵。

$$\delta_i^j = \frac{\nabla_{(\min)} + \rho \nabla_{(\max)}}{\nabla_i^j + \rho \nabla_{(\max)}} \quad (i=2,3,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

ρ 为分辨系数一般取 0-1 之间的任意数。

$$\delta = \begin{pmatrix} \delta_1^1 & \delta_1^2 & \dots & \delta_1^m \\ \delta_2^1 & \delta_2^2 & \dots & \delta_2^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_n^1 & \delta_n^2 & \dots & \delta_n^m \end{pmatrix}$$

(5) 计算关联度结果

根据求出的关联度矩阵, 取每一列矩阵的平均值作为此种影响因素的关联度, 计算公式如(4)所示:

$$r_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^j \quad (i=2,3,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

(6) 关联度排序

关联度越大, 说明比较序列与参考序列变化趋势越接近, 针对本文来说, 关联度越大, 就代表此种影响因素对水质变化的驱动力越大, 对水质的影响也越大。

3. 水质影响因子选取

3.1. 气象影响因子

随着汾河流域水质的恶化与演变, 自然条件中气象因素受社会和人为因素影响较大, 气象因素的不断变化在在汾河干流的水质变化中占较重的地位, 所以, 本文选取气象因素作为影响汾河干流水质变化的主要因子, 气象因素包括气温、降雨量和相对湿度。本文主要采用太原市监测数据作为汾河干流水质影响因子分析模型的研究对象。太原市的年平均气温、降雨量、相对湿度分别如图 1、图 2 和图 3 所示。

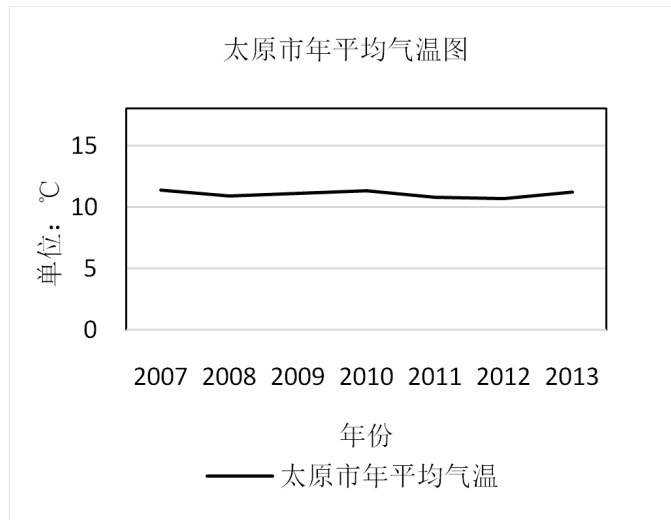


Figure 1. The annual average temperature at Taiyuan
图 1. 太原市年平均气温统计图

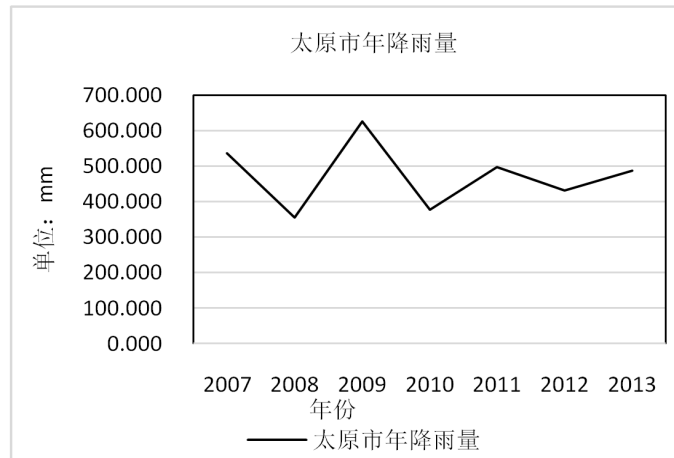


Figure 2. The average annual rainfall at Taiyuan
图 2. 太原市年平均降雨量统计图

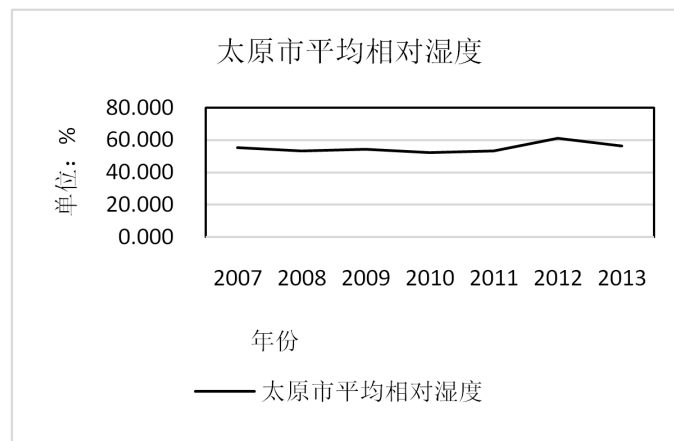


Figure 3. The average relative humidity at Taiyuan
图 3. 太原市年平均相对湿度统计图

从 2007 年以来，太原市的年平均气温一直处于一个相对稳定的状态，在 2012 年太原市出现了年平均最低气温 10.8℃，在 2007 年出现了最高气温 11.4℃。但是总体的气温变化幅度不是太大，变化范围为 1℃。温度的变化会影响年蒸发量，对一些污染物质的扩散和净化将产生催化作用，所以要采用温度作为影响因子；从太原市的年平均降雨量来看，自 2007 年以来，太原市的年降雨量整体变化幅度比较大。降雨量最大年份在 2009 年，降雨量为 625.1 mm，最少的年份 2008 年，为 355.3 mm。年平均降雨量在 350 mm 以上，相比较往年的降雨量来说，2008 年个 2010 年属于枯水年，降雨量低于多年平均降雨量。由于降雨量的大小将直接影响污染物的稀释程度，所以年际间降雨量的差别将会对水质的优劣产生直接的影响。

从太原市年平均相对湿度的统计表中可以很明显的看出，年平均相对湿度有上升趋势，从 2007 年到 2011 年，太原市的年平均相对湿度是呈现一个相对稳定状态，但从 2012 年开始，开始呈现上升趋势。相对湿度不仅很影响蒸发量，还会为污染物质提供各种适宜或非适宜的生存环境，对水质优劣将产生间接的影响。

3.2. 非气象影响因子

汾河上游建成并投入使用的大(I)型水库一座和大(II)型水库一座，径流能对水质起到稀释和净化的作用，水库是投产使用势必会对水库下游的径流产生影响，所以选择径流作为水质影响的非气象因子；由于前很多年人们对于水生态保护的意识比较薄弱，单纯的追求经济效益，工业污水的排放和居民生活废水生活垃圾倾倒入为汾河水质的变化起到了一定的负面影响，汾河干流的年平均径流、工业年污水排放总量、居民生活年污水排放总量分别如图 4、图 5、图 6。

由于汾河水库和二库的建成及投入使用，大部分天然径流被拦截，汾河干流的径流一直是根据汾河水库和二库的下泄流量变化，一直是处于一个比较低的状态，山西省 2008 年以来实施了“千里汾河清水复流工程”，通过从外流域调水改善汾河缺水状态，不仅使汾河多年断流的状况有所改善，也使得流域内地下水位停止下降有所回升。这是为什么 2008 年以后汾河干流径流量突然增加的原因，但在汾河全线复流、生态环境初步改善的同时，汾河干流的水资源总量让然在不断减少，2015 年的汾河流域多年平均产水量已下降到 13.3 亿立方米，只有上世纪五六十年代 26.5 亿立方米的一半，流域生态恶化的趋势依然严峻。从 2007 年始，工业污水的排放量一直处于较高的状态，这使得汾河的水污染情况日益加重，但在 2008 年以后出现了下降，但在 2011 年后又出现短暂峰值。

生活污水的排放总量一直处于一个上升的趋势，这根人口增长和人民生活水平提高具有很大的关系，上升幅度在 2%~20%之间，尤其是 2007 年到 2008 年和 2011 年到 2012 年，增长幅度高达 19%、16%。



Figure 4. The annual runoff of Fen River
图 4. 汾河年径流统计图

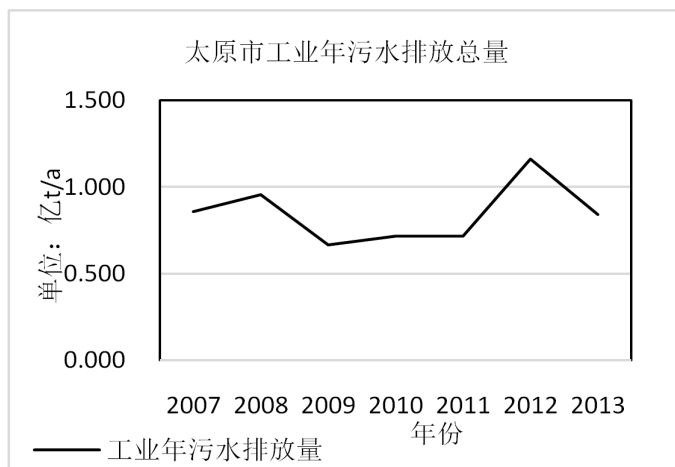


Figure 5. The industrial wastewater emissions at Taiyuan
图 5. 太原工业年污水排放量统计图

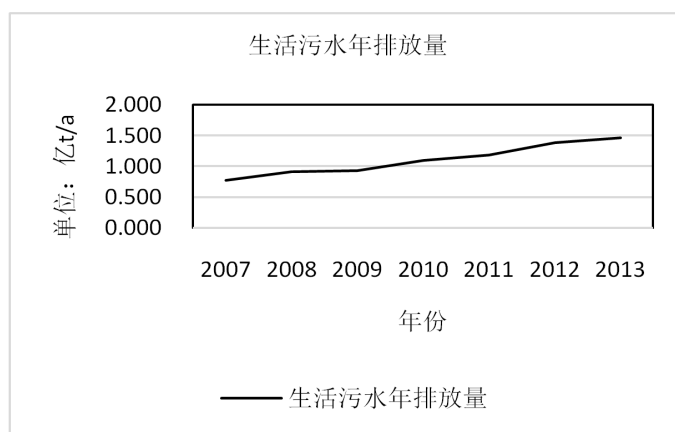


Figure 6. The sewage emissions of Taiyuan
图 6. 居民生活年污水排放量统计图

4. 计算结果和分析

汾河干流的水质优劣的主要因素为氨氮、化学需氧量和五日生化需氧量，反而是 PH 和溶解氧对水质的影响较小，尤其是 PH 在近十年的数据中显示，PH 一直是处于 I 的标准并未对汾河水质的优劣产生明显的影响，所以本文的研究重点是后三种水质影响因子，即：氨氮、化学需氧量和五日生化需氧量。本文选取 2007 年至 2013 年的水质控制因子 COD、氨氮、五日生化需氧量分别作为参考序列，与上文提到的六个影响因子整合成评价矩阵，首先以 COD 为例进行计算：

(1) 根据公式(4)计算关联度，其中参数 ρ 取 0.5，计算出的关联度矩阵如下所示：

$$Z = \begin{pmatrix} 220 & 11.4 & 55.2 & 535.4 & 3.087 & 0.8596 & 0.7689 \\ 175 & 10.9 & 53 & 355.3 & 3.382 & 0.9567 & 0.9124 \\ 104.32 & 11.1 & 54 & 625.1 & 6.044 & 0.667 & 0.9287 \\ 113 & 11.3 & 52 & 376.6 & 4.541 & 0.7164 & 1.091 \\ 115 & 10.8 & 53 & 496.6 & 5.868 & 0.7169 & 1.1835 \\ 143 & 10.7 & 61 & 431.1 & 7.888 & 1.1611 & 1.3813 \\ 86.9 & 11.2 & 56 & 487.3 & 12.621 & 0.8425 & 1.4636 \end{pmatrix}$$

其中 X_0 表示 2007 年至 2013 年的 COD 浓度变化, 单位 mg/L; X_1 表示 2007 年至 2013 年的年均温度变化, 单位 $^{\circ}\text{C}$; X_2 表示 2007 年至 2013 年的相对湿度的变化情况, 无量纲单位; X_3 表示 2007 年至 2013 年的年均降雨量的变化情况, 单位 mm; X_4 表示 2007 年至 2013 年的年径流的变化情况, 单位 m^3/s ; X_5 表示 2007 年至 2013 年的工业年排放污水情况, 单位亿 t/a; X_6 表示 2007 年至 2013 年的居民生活污水年排放情况, 单位亿 t/a。

(2) 将序列 Z 无量纲化后形成, 无量纲矩阵 Y :

$$Y = \begin{pmatrix} 1.609 & 1.031 & 1.006 & 1.133 & 0.498 & 1.016 & 0.696 \\ 1.28 & 0.986 & 0.966 & 0.752 & 0.545 & 1.202 & 0.826 \\ 0.763 & 1.004 & 0.984 & 1.323 & 0.974 & 0.789 & 0.841 \\ 0.826 & 1.022 & 0.947 & 0.797 & 0.732 & 0.932 & 0.988 \\ 0.841 & 0.977 & 0.966 & 1.051 & 0.946 & 0.848 & 1.072 \\ 1.046 & 0.968 & 1.111 & 0.912 & 1.271 & 1.002 & 1.251 \\ 0.635 & 1.013 & 1.020 & 1.031 & 2.034 & 0.996 & 1.325 \end{pmatrix}$$

(3) 求解绝对差值矩阵、最大和最小矩阵

$$\nabla_{\max} = (0.578 \quad 0.603 \quad 0.560 \quad 1.399 \quad 0.592 \quad 0.912)$$

$$\nabla_{\min} = (0.078 \quad 0.066 \quad 0.029 \quad 0.094 \quad 0.007 \quad 0.078)$$

$$\nabla = \begin{pmatrix} 0.578 & 0.603 & 0.476 & 1.111 & 0.592 & 0.912 \\ 0.294 & 0.314 & 0.528 & 0.735 & 0.078 & 0.453 \\ 0.241 & 0.221 & 0.560 & 0.211 & 0.026 & 0.078 \\ 0.196 & 0.121 & 0.029 & 0.094 & 0.106 & 0.162 \\ 0.136 & 0.125 & 0.210 & 0.105 & 0.007 & 0.231 \\ 0.078 & 0.066 & 0.133 & 0.226 & 0.044 & 0.205 \\ 0.377 & 0.385 & 0.396 & 1.399 & 0.361 & 0.690 \end{pmatrix}$$

(4) 根据公式(4)计算关联度, 其中参数 ρ 取 0.5, 计算出的关联度矩阵如下所示:

$$\delta = \begin{pmatrix} 0.423 & 0.406 & 0.409 & 0.438 & 0.341 & 0.390 \\ 0.630 & 0.596 & 0.383 & 0.554 & 0.810 & 0.587 \\ 0.692 & 0.703 & 0.368 & 0.872 & 0.941 & 1.000 \\ 0.757 & 0.869 & 1.000 & 1.000 & 0.753 & 0.865 \\ 0.864 & 0.862 & 0.631 & 0.987 & 1.000 & 0.778 \\ 1.000 & 1.000 & 0.748 & 0.858 & 0.892 & 0.808 \\ 0.551 & 0.535 & 0.458 & 0.378 & 0.461 & 0.466 \end{pmatrix}$$

(5) 基于 COD 最终的关联度计算结果及排序如下表 1 所示。

针对不同的控制因子, 关联度可能有较大的差别, 因为不同的控制因子, 即污染物质对于生存环境的需求不同, 以至于环境发生变化时体现出其浓度的变化, 以相同的计算过程, 本文又对控制因子为氨氮和五日生化需氧量进行了关联度计算, 计算结果表 2 和表 3 所示。

为了更好的反映出影响因子对水质的影响强弱程度, 在以上计算的基础上计算出总关联度。计算结果如下表 4 所示。

综合以上计算结果表明: 影响汾河干流水质的气象因子和非气象因子的综合排列顺序为: 工业 > 生活 > 温度 > 径流 > 相对湿度 > 降雨量。

Table 1. Correlation and sorting table of COD**表 1.** COD 的关联度及排序表

排序	1	2	3	4	5	6
影响因子	工业	径流	相对湿度	温度	生活	降雨量
关联度	0.742	0.727	0.710	0.702	0.699	0.571

Table 2. Correlation and sorting table of NH₃-N**表 2.** 氨氮的关联度及排序表

排序	1	2	3	4	5	6
影响因子	生活	降雨量	径流	工业	温度	相对湿度
关联度	0.756	0.748	0.665	0.630	0.6231	0.6226

Table 3. Correlation and sorting table of BOD₅**表 3.** 生化需氧量的关联度及排序表

排序	1	2	3	4	5	6
影响因子	工业	温度	相对湿度	生活	径流	降雨量
关联度	0.820	0.769	0.703	0.670	0.668	0.568

Table 4. Correlation and sorting table**表 4.** 关联度及排序表

排序	1	2	3	4	5	6
影响因子	工业	生活	温度	径流	相对湿度	降雨量
关联度	0.739	0.710	0.703	0.688	0.681	0.641

5. 结论

汾河干流水质变化是气象因子和非气象因子共同作用的结果,从结果中很明显的可以看出,非气象因子对于汾河干流的水质影响较大,其中工业和居民生活污水的排放对于汾河水水质作用较大,这两个因子是导致汾河水水质变化的主要驱动力;原因是各类污水未经处理直接排放进入汾河,而由于汾河的纳污能力是有一定范围,当超过了汾河干流的纳污能力时,宏观的表现即为汾河水水质的恶化。另一个原因是汾河上游水库的建成并投产使用,对下游的径流产生较大影响,原有的自然径流被拦截,致使汾河干流径流周期与水库的泄水周期一致,削弱了水量对水质的净化和稀释作用,如结果中显示所示,径流的驱动力仅次于温度。上世纪末至本世纪初,为了提高经济效益,忽视了水资源的合理开发和利用,将未经处理的大量的工业污水和居民生活用水直接排入汾河,这些污废水量大、污染物质多而复杂,是造成汾河污染加重的主要原因。所以实际操作中的改善水质的有效方法为在污水源头对其进行行之有效的污水处理,并将生态调度计划融入水库调度之中,改善下游水质情况,为汾河干流水生态保护提供基础理论。

参考文献 (References)

- [1] 杨炯, 马一方. 10 年间汾河干流 COD_{Cr} 污染研究[J]. 山西能源与节能, 2008(1): 17-18, 20.
YANG Jiong, MA Yifang. Pollution research of COD_{Cr} about Fenhe River in 10 years. Shanxi Energy and Conservation, 2008(1): 17-18, 20. (in Chinese)
- [2] 吕安, 邱文, 盛若虹, 等. 汾河水水质状况研究[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(10): 97-101.
LU An, QIU Wen, SHENG Ruohong, et al. The research of water quality in Fenhe River. Environmental Science and Mana-

- gement, 2012, 37(10): 97-101. (in Chinese)
- [3] 盛夏, 张红, 苏超, 等. 基于 BP 神经网络的汾河水质评价[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2013, 36(2): 301-307.
SHENG Xia, ZHANG Hong, SU Chao, et al. Based on the BP neural network to evaluate water quality in Fenhe River. Journal of Shanxi University, 2013, 36(2): 301-307. (in Chinese)
- [4] 李玮, 褚俊英, 秦大庸, 等. 基于补水配置情景的河流水质及环境容量研究——以汾河干流为例[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(1): 9-16.
LI Wei, CHU Junying, QIN Dayong, et al. The simulation of water environment capacity of Fenhe River based on the scenarios of ecological water supplement. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(1): 9-16. (in Chinese)
- [5] 徐明德, 李平. 汾河太原城段的水质调查与分析[J]. 中国给水排水, 2005, 21(4): 102-104.
XU Deming, LI Ping. The water quality investigation and analysis of Fenhe River in Taiyuan city section. China's Water Supply and Drainage, 2005, 21(4): 102-104. (in Chinese)
- [6] 梁新阳. 汾河 10 年水质污染分析与治理保护建议[J]. 山西水利科技, 2009(1): 76-78.
LIANG Xinyang. Water quality pollution analysis and protection about Fenhe River in 10 years. Shanxi Hydrotechnics, 2009(1): 76-78. (in Chinese)
- [7] 周丕严, 张江山, 陈庆华, 等. 模糊评价模型的改进及其在水质评价中的应用[J]. 云南环境科学, 2006, 25(4): 50-51, 55.
ZHOU Peiyan, ZHANG Jiangshan, CHEN Qinghua, et al. The fuzzy evaluation model and its application in water quality evaluation. Yunnan Environmental Science, 2006, 25(4): 50-51, 55. (in Chinese)
- [8] 陈秋帆. 剑湖湿地退化驱动因子和生态水工修复研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南农业大学, 2016.
CHEN Qiufan. The research of wetland degradation driving factors and ecological hydraulic in Jian Lake. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2016. (in Chinese)